

## Микрокриогенная система Стирлинга с лантаноидным регенератором и магнитокалорической ступенью охлаждения

А. В. Самвелов, Д. А. Сысоев, Н. Н. Оганесян, И. В. Баранов, А. Ю. Баранов

*Разработана двухступенчатая микрокриогенная система (МКС) Стирлинга для криостатирования матричного фотоприёмного устройства (МФПУ) с редкоземельным (лантаноидным) регенератором в первой ступени охлаждения и магнитокалорическим охлаждением во второй ступени. Детандер МКС имеет встроенный активный регенеративный теплообменник. Вторая ступень охлаждения представляет собой редкоземельную насадку регенератора и неподвижный постоянный кольцевой магнит для обеспечения магнитокалорического охлаждения. Вторая ступень работает на эффекте адиабатного размагничивания предварительно охлаждённого гольмия. Система обеспечивает расширенный интервал температур криостатирования и отличается повышенным КПД вблизи температуры охлаждения 80 К.*

*Ключевые слова:* микрокриогенная система, магнитокалорический эффект, лантаноиды, регенератор, холодопроизводительность.

### Введение

Микрокриогенные системы Стирлинга обычно предназначаются для охлаждения матричных фотоприёмных устройств. В настоящее время проводятся интенсивные исследования в интересах повышения эффективности МКС, в т. ч. с использованием новых методов (технологий).

Одной из таких технологий является магнитное охлаждение. В её основе лежит магнитокалорический эффект. В последние десятилетия наблюдается рост интереса к исследованию магнитокалорического эффекта для его применения в микрокриогенной технике. В этот период было разработано и запатентовано множество рефрижераторов, охладителей и тепловых насосов с использованием как в основной, так и в дополнительной ступенях охлаждения на основе магнитокалорического эффекта, реализуемого при помощи лантаноидов. Это явление наблюдается при адиа-

батном размагничивании парамагнитного материала, обладающего хорошими магнитными свойствами при температурах вблизи температуры Кюри (Нееля) и, в частности, высоким магнитокалорическим эффектом. Эффект возникает, когда в изотермических условиях рабочий элемент из такого материала намагничивается в магнитном поле, нагреваясь при этом, а затем, при съёме магнитного поля, размагничивается, в процессе чего, охлаждаясь, обеспечивает криостатирование объекта.

Целью данной работы является исследование разработанной двухступенчатой микрокриогенной системы Стирлинга для криостатирования МФПУ с редкоземельным (лантаноидным) регенератором в первой ступени охлаждения и магнитокалорическим охлаждением во второй ступени. В отличие от известных МКС Стирлинга, здесь появляется дополнительная ступень охлаждения криоагента, работающая на магнитокалорическом эффекте, что приводит к росту КПД и расширению рабочего диапазона температур.

### Постановка работы

Разработанная МКС Стирлинга имеет в первой ступени охлаждения активный магнитный регенератор на основе гольмия, во второй ступени охлаждения – магнитокалорический охладитель и неподвижные постоянные магниты. Система обладает пониженным энергопотреблением и расширенным интервалом рабочих температур при повышенном КПД вблизи температуры криостатирования 80 К.

Самвелов Андрей Витальевич<sup>1</sup>, начальник НТЦ.

Сысоев Дмитрий Анатольевич<sup>1</sup>, инженер.

Оганесян Николайос Норикович<sup>1</sup>, инженер.

Баранов Игорь Владимирович<sup>2</sup>, декан, д.т.н.

Баранов Александр Юрьевич<sup>2</sup>, зав. кафедрой, д.т.н.

<sup>1</sup> АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

E-mail: samv-andrej@yandex.ru; diima1989@yandex.ru;

nik-oganesyan@rambler.ru

<sup>2</sup> Университет ИТМО.

Россия, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский просп., 49.

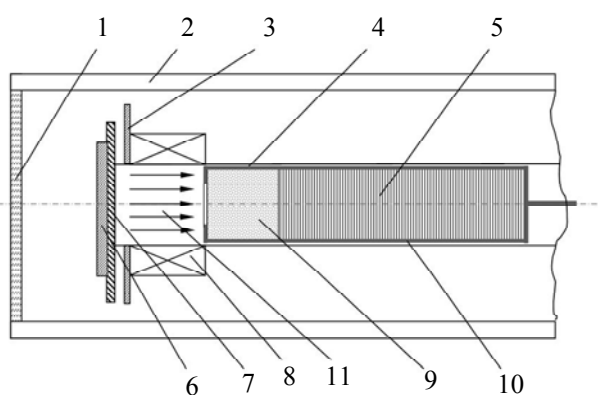
Статья поступила в редакцию 28 ноября 2017 г.

© Самвелов А. В., Сысоев Д. А., Оганесян Н. Н., Баранов И. В., Баранов А. Ю., 2017

Низкотемпературная ступень представленной МКС работает на основе магнитокалорического эффекта, имеет в составе комбинированный регенеративный теплообменник с областью насадки в «холодной» зоне, выполненной из редкоземельного металла гольмия, «тёплая» зона насадки регенератора заполнена элементами, изготовленными из стали марки 12Х18Н10Т в виде набранных в пакет сетчатых дисков.

Заметим, что лантаноидная часть магнитокалорического охладителя одновременно является «холодным» участком насадки регенеративного теплообменника, что повышает эффективность регенерации.

Эскиз охладителя МКС иллюстрируется рисунком.



**Рис.** Охладитель МКС Стирлинга с магнитокалорической ступенью охлаждения: 1 – оптическое окно МФПУ; 2 – вакуумный теплоизолирующий корпус; 3 – антимагнитный экран; 4 – детандер со встроенным регенеративным теплообменником; 5 – область насадки регенеративного теплообменника из стали 12Х18Н10Т; 6 – МФПУ; 7 – держатель МФПУ; 8 – активный магнитный элемент; 9 – парамагнитная область насадки (гольмий) регенеративного теплообменника; 10 – детандерный поршень; 11 – направление магнитного поля.

### Описание системы

Изотермическое расширение в новом конструктивном исполнении цикла Стирлинга выполняется детандерным поршнем (10) при движении вправо (см. рис.). Газообразный гелий, являющийся рабочим газом цикла, при этом расширяется, отдавая работу, охлаждается, отбирая тепло от охлаждаемого объекта (6).

Холодопроизводительность в идеальном цикле оценивается уравнением:

$$Q_o = MR T_o \ln (V_1/V_2), \quad (1)$$

где  $M$  – массовый расход гелия, кг/с;  $R$  – газовая постоянная гелия, Дж/(кг К),  $T_o$  – температура криостатирования, К;  $V_1, V_2$  – максимальный и минимальный объёмы цикла соответственно, м<sup>3</sup>.

Изохорное охлаждение осуществляется в регенеративном теплообменнике, имеющем две области (насадки), а именно, основную, выполненную из стали 12Х18Н10Т (5), и парамагнитную (лантаноидную) – из мелкозернистого поликристаллического гольмия (9). Сконструированный таким образом комбинированный регенеративный теплообменник с 20-ти процентным заполнением по длине гольмием со стороны зоны криостатирования, имеющим высокую теплопроводность в диапазоне температур 60–80 К, позволит более эффективно осуществлять регенерацию рабочего газа (гелия). Эффективность регенерации определяется потерями от недорегуляции регенеративного теплообменника:

$$\Delta T_H = \frac{M_g c_{pr} (T_g - T_x)}{M_n c_n}, \quad (2)$$

где  $M_g, M_n$  – масса гелия и насадки регенератора соответственно, кг;  $c_{pr}, c_n$  – теплоёмкость гелия и насадки регенератора соответственно, Дж/(кг К),  $T_g, T_x$  – соответственно температура «горячего» и «холодного» дутья, К.

Усреднённая удельная теплоёмкость стали 12ХН10Т, применяемая в предыдущих разработках [патент на полезную модель № 142459], в интервале температур 60–80 К составляет около 150 Дж/(кг К), тогда как у чистого гольмия в данном диапазоне температур она составляет около 220 Дж/(кг К). Следовательно, потери от недорегуляции при замене в зоне криостатирования участка насадки регенеративного теплообменника из 12Х18Н10Т (5) на участок из гольмия (9) должны снизиться на 25–30 % при прочих равных условиях. КПД микрокриогенной системы возрастёт на 10–15 %.

Вторая ступень охлаждения в разработанной микрокриогенной системе Стирлинга, магнитокалорическая, включает в себя парамагнитную гольмиевую часть регенеративного теплообменника (9) и кольцевой активный магнитный элемент (8).

Работа второй ступени криостатирования реализуется следующим образом. Детандерный поршень (10), находясь в крайнем левом положении, перед реализацией первой фазы криостатирования расположен концентрически в кольцевом активном магнитном элементе (8). При этом парамагнитная часть регенеративного теплообменника находится под воздействием магнитного поля напряжённостью 2 Тл. Происходит изотермическое намагничивание гольмия. Теплота намагничивания снимается при работе устройства. Затем в процессе расширения, т. е. перемещения детандерного поршня вправо, и последующего охлаждения гелия гольмиевая часть регенеративного

теплообменника (9) выходит из поля действия магнита (8). Выполняется процесс адиабатного размагничивания с понижением температуры гольмия, описываемый выражением для холодопроизводительности при магнитокалорическом эффекте:

$$\Delta Q_{\text{МК}} = -T \left( \frac{\partial M}{\partial T} \right)_{\text{P.H}} \Delta H, \quad (3)$$

где  $M$  – намагниченность гольмия, А/м;  $T$  – температура, К;  $H$  – напряженность магнитного поля, Тл.

Обе ступени криостатирования работают синхронно во времени. При выходе микрокриогенной системы на режим частота перемещений детандерного поршня (10) снижается, что даёт возможность эффективной реализации магнитокалорического эффекта, поскольку при повышенных частотах из-за наличия магнитного гистерезиса активного магнита (8) магнитокалорического эффекта можно не получить. Вторая ступень криостатирования позволит понизить температуру криостатирования до 60–65 К.

В качестве материала активного магнита используется интерметаллический редкоземельный материал – неодим–железо–бор. «Холодная» область регенеративного теплообменника изготавливается из парамагнитного поликристаллического гольмия высокой чистоты мелкозернистой структуры. Основная область насадки регенеративного теплообменника выполнена в виде сетчатых элементов из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т.

Предлагаемое устройство охлаждения Стирлинга с магнитокалорической ступенью криостатирования позволит расширить диапазон температур криостатирования до 80–60 К, повысить КПД микрокриогенной системы на 10–15 %, снизить потребляемую мощность на 15 %.

### Результаты исследований

Достигается эффективная регенерация тепла в активном регенеративном теплообменнике, а также дополнительное охлаждение во второй магнитокалорической ступени устройства.

Таким образом достигается снижение температуры криостатирования до 60 К, потребляемой мощности до 12–15 %, повышение КПД на 8–10 %.

### Заключение

Разработана двухступенчатая микрокриогенная система для криостатирования матричного фотоприёмного устройства на основе газовой криогенной машины Стирлинга со ступенью окончательного охлаждения на основе магнитокалорического эффекта. Рабочее тело первой ступени – газообразный гелий, рабочее тело второй ступени – двухфункциональный эффективный активный регенеративный теплообменник для предварительного охлаждения, выполненный в «холодной» зоне из редкоземельного металла – гольмия. В первой ступени реализуется процесс изотермического расширения гелия с подводом тепла по традиционному циклу Стирлинга, во второй ступени охлаждённый гелий окончательно охлаждается в процессе снятия магнитного поля с магнитокалорической ступени (редкоземельной части регенеративного теплообменника), т. е. реализуется магнитокалорический эффект. Таким образом, после окончательного охлаждения гелий способен довести температуру криостатирования объекта до температуры вблизи 60 К, сохраняя при этом достаточную энергетическую эффективность цикла.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Араkelов Г. А., Самвелов А. В. // Прикладная физика. 2002. № 6. С. 78.
2. Еремчук А. И., Самвелов А. В., Сысоев Д. А., Широков Д. А., Оганесян Н. Н. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 2. С. 224.
3. Колесников А. М., Самвелов А. В., Словеснов К. В. // Прикладная физика. 2010. № 2. С. 80.
4. Трошкин Ю. С., Чапкевич А. Л., Горбунов Е. К., Посевин О. П., Самвелов А. В. // Прикладная физика. 1999. № 3. С. 60.
5. Формозов Б. Н. Аэрокосмические фотоприёмные устройства в видимом и инфракрасном диапазонах. – Санкт-Петербург: СПбГУАП, 2002.
6. Суслов А. Д. Криогенные газовые машины. – Москва: Машиностроение, 1982.
7. Нефедьев С. П., Дёма Р. Р., Молочкова О. С. Материаловедение. – Магнитогорск, 2014.
8. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. – М.: «Логос», 2004.
9. Политова Г. А., Бурханов Г. С., Терешина И. С., Каминская Т. П., Чжан В. Б., Терешина Е. А. // Журнал технической физики. 2017. Т. 87. Вып. 4. С. 4.
10. Андреевко А. С., Белов К. П., Никитин С. А., Тишин А. М. // Успехи физических наук. 1989. Т. 158. Вып. 4. С. 597.

## Microcryogenic Stirling system with the lanthanide regenerator and magnetocaloric cooling stage

A. V. Samvelov<sup>1</sup>, D. A. Sysoev<sup>1</sup>, N. N. Oganesyan<sup>1</sup>, I. V. Baranov<sup>2</sup>, and A. Yu. Baranov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Orion R&P Association  
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia  
E-mail: samv-andrej@yandex.ru; diima1989@yandex.ru;  
nik-oganesyan@rambler.ru

<sup>2</sup> National Research University ITMO  
49 Kronverksky av., St.-Petersburg, 197101, Russia

Received November 28, 2017

*A two-stage Stirling microcryogenic system (MCS) for cryostatting a matrix photodetector device with a rare-earth (lanthanide) regenerator in the first stage of cooling and a second-stage magnetocaloric cooling was developed. The MCS expander has a built-in active regenerative heat exchanger. The second stage of cooling is a rare-earth nozzle of a regenerator and a stationary permanent annular magnet for providing magnetocaloric cooling. The second stage works on the effect of adiabatic demagnetization of precooled holmium. The system provides an extended cryostat temperature range and is characterized by an increased efficiency near the cooling temperature of 80 K.*

*Keywords:* microcryogenic system, magnetocaloric cooling, lanthanide, regenerator, cool down power.

### REFERENCES

1. G. A. Arakelov and A. V. Samvelov, Prikl. Fiz., No. 6, 78 (2002).
2. A. I. Eremchuk, A. V. Samvelov, D. A. Sysoev, et al., Usp. Prikl. Fiz. **1** (2), 224 (2013).
3. A. M. Kolesnikov, A. V. Samvelov, and K. V. Slovesnov, Prikl. Fiz., No. 2, 80 (2010).
4. Yu. S. Troshkin, A. L. Chapkevich, E. K. Gorbunov, et al., Prikl. Fiz., No. 3, 60 (1999).
5. B. N. Formozov, *Aerospace Photodevices* (SPb, 2002) [in Russian].
6. A. D. Suslov, *Cryogenic Gas Machines* (Moscow, Mashinost., 1982) [in Russian].
7. S. P. Nefed'ev, R. R. Dema, and O. S. Molochkova, *Materials Science* (Magnitogorsk, 2014) [in Russian].
8. V. V. Tarasov and Yu. G. Yakushenkov, *IR Systems of Looking Type* (Moscow, Logos, 2004) [in Russian].
9. G. A. Politova, G. S. Burkhanov, I. S. Tereshina, et al., Tech. Phys. **87** (4), 4 (2017).
10. A. S. Andreenko, K. P. Belov, S. A. Nikitin, et al., Sov. Phys. Usp. **158**, 597 (1989).